



مرکز پژوهشی مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



مجتبی تجزیه چی
دانشگاه هرمزگان

احسان ابراهیمی مرزونی
دانشگاه هرمزگان

مرتضی نقی پور
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

tajziehchi@hotmail.com

ehsan_em61@yahoo.com

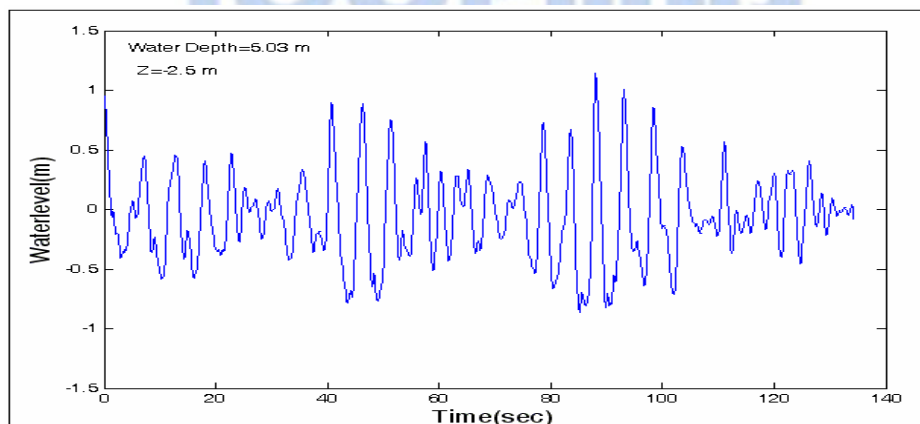
m-naghi@nit.ac.ir

چکیده

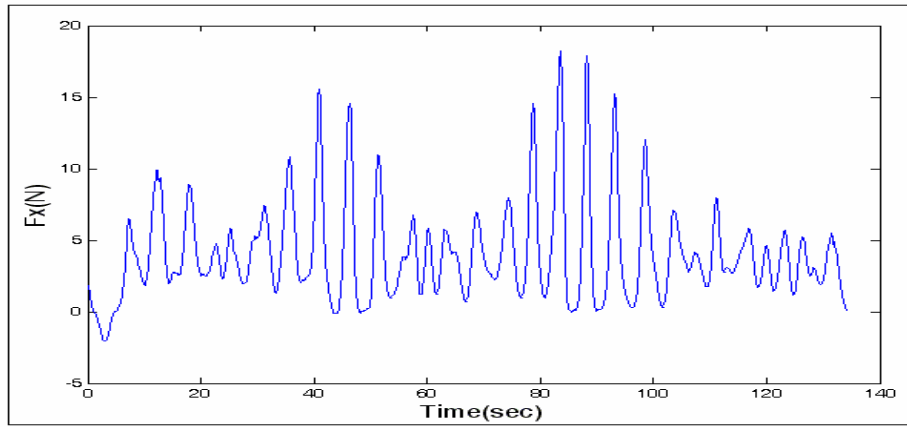
سرعت سنج توپی متخلخل (Perforated-ball Velocity Meter) نیروهای وارده از موج به ستونهایی که برای نگهداری توپ و لوله ساخته شده است را اندازه گیری می کند. کینماتیک موج از این نیروها بوسیله حل معکوس معادله موريسون محاسبه می گردد. ضریب درگ و اینرسی توپ از راه آزمایش تعیین می شوند و نیروهای وارد بر توپ در حل معکوس معادله موريسون استفاده می شود، در این مقاله انتخاب گردیده است و داده های آزمایشگاهی که با استفاده از PVM در کانال موج دلتا در آزمایشگاه دلفت هلند (Delft) انجام شده بود، کینماتیک اندازه گیری شده با کینماتیک محاسبه شده که از برنامه عددی برای حل معکوس معادله موريسون با استفاده از اندازه گیری ارتفاع سطح آزاد، تئوری امواج خطی و تئوری شکل دادن انبساطی ¹Wheeler بدست می آید، مقایسه گشته و بصورت نمودارهایی ارائه می گردند. این مقایسه نشان می دهد که کینماتیک اندازه گیری شده بوسیله PVM می تواند ارتفاع سطح آزاد را با یک دقت خوب نتیجه دهد.

پیش در آمد

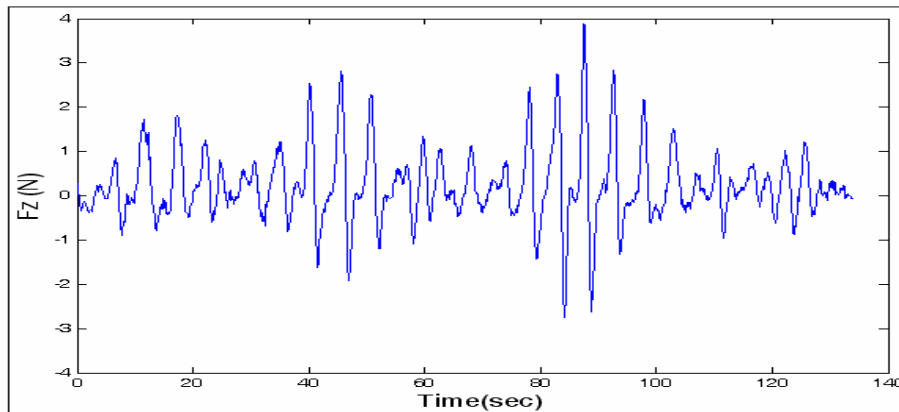
در میان وسایل اندازه گیری سرعت، سرعت سنج های توپی متخلخل (PVM) در عملیات آزمایشگاهی بزرگ به کار می رود و نسبت به دیگر وسایل برتری متمایزی دارد. این دستگاه می تواند تمام سه مؤلفه مربوط به سرعت را در عمق های مختلف با ثابت کردن سنسورها در آن عمق به طور هم زمان اندازه گیری کند. این دستگاه، با دارا بودن ویژگی هایی هم چون سادگی، بی اثر بودن در مقابل افت سرعت، صداهای الکتریکی و تداخل صدا در اثر دو فرستنده، در مقیاس بزرگ در Christchurch Bay Tower استفاده شده است (Bishop, 1984). یک دستگاه PVM نیروهای وارده از موج به ستون هایی که برای نگهداری توپ و لوله ساخته شده است را اندازه گیری می کند. کینماتیک موج از این نیروها بوسیله حل معکوس معادله موريسون محاسبه می گردد. برنامه عددی برای حل معکوس معادله موريسون و بدست آوردن کینماتیک از اندازه نیرو، تهیه شده و برای انجام این تحقیق از داده های آزمایشگاهی موجود استفاده گردیده است (Wolfram & Naghipour, 1999). این داده ها مربوط به کانال موج دلتاست که دارای ۲۵۰ متر طول و ۵ متر پهنا می باشد و در طی آزمایشات بطور متوسط با آبی به عمق ۵ متر پر شده بود. تولید امواج توسط یک صفحه مولد موج که بطور هیدرولیکی به حرکت در می آید صورت می گرفت. با وسایل موجود امکان ایجاد هر دو نوع موج منظم و تصادفی فراهم بوده است. پریود امواج ۳ تا ۱۰ ثانیه بوده و نهایت ارتفاعی که برای امواج مذکور در این پریود ها ایجاد شده بود به ۲ متر می رسد. در این مقاله داده های انتخاب شده از آزمایشات مذکور، در ارتباط با موج های تصادفی است که دارای تاج موج های طویل و با ارتفاع مشخصه ۱/۵ متر و پریود پیک (Peak) ۵/۹ ثانیه می باشد. اشکال ۱ تا ۴ داده های آزمایشگاهی مورد استفاده در این مقاله را نشان می دهد.



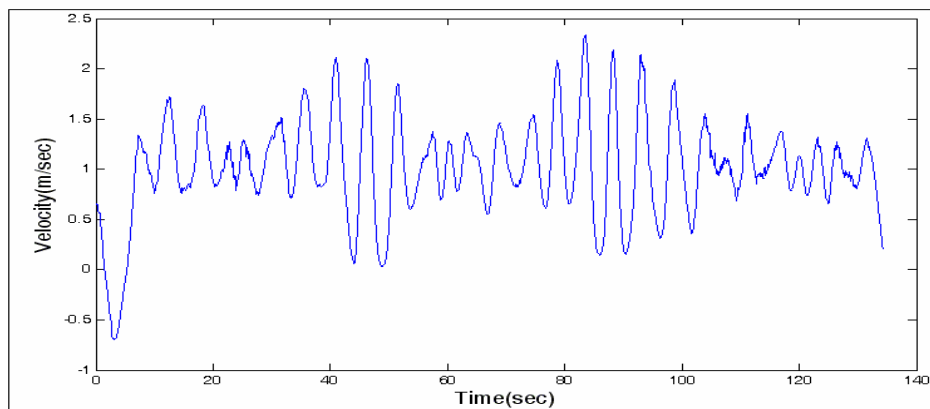
شکل ۱: تاریخچه زمانی اندازه گیری شده سطح آب (از داده های موجود)



شکل ۲: تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده نیروی امواج $F(x)$ توسط PVM (از داده های موجود)



شکل ۳: تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده نیروی امواج $F(z)$ توسط PVM (از داده های موجود)



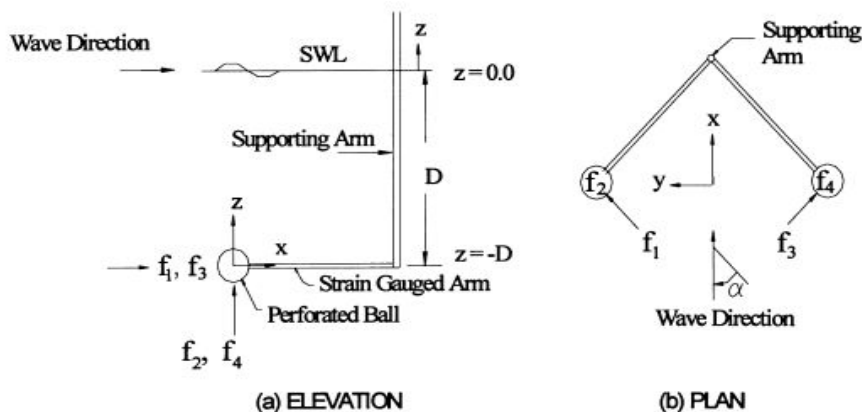
شکل ۴: تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده سرعت امواج (از داده های موجود)

قاعده کلی سرعت‌سنج‌های توپی متخلخل

سرعت‌سنج‌های توپی متخلخل (PVM) در اصل یک وسیله لایروبی است، وسیله‌ای که در آن یک توپ توخالی سوراخدار، بر روی طره کشت‌سنج سوار شده است. شکل ۵، بطور شماتیک بالآمدن و بارگیری توپ در یک مرحله تنها از اندازه‌گیری سرعت را نشان می‌دهد (Bhattacharyya, 2000).

بازوهای کرنش‌سنج^۲ مؤلفه‌هایی از نیرو را که توسط موج به توپ اعمال می‌گردد، احساس می‌کند. مؤلفه‌های سرعت ذرات آب از اندازه‌گیری نیروها بدست می‌آید. با ثابت کردن جفت بازوهای کرنش‌سنج در زوایای سمت راست به یکدیگر و نگهداشتن صفحه هر یک از پایه‌ها بصورت عمودی یا افقی می‌توان تمام سه مؤلفه نیروها را اندازه‌گیری کرد. زاویه بین راستای موج و یکی از بازوهای پایه با α نشان داده می‌شود (زاویه

با بازوی دیگر $90^\circ - \alpha$ می‌شود). معمولاً در آزمایش فلوم موج $\alpha = 45^\circ$ در نظر گرفته می‌شود. دیگر اندازه‌های می‌تواند در آزمایشات دامنه موج مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: تصویری از PVM و جهت مؤلفه‌های نیرو

نیروی اندازه‌گیری شده بوسیله PVM، $f_j(t)$ (j از ۱ تا ۴) می‌باشد. این نیروها در راستای x ، y ، z این چنین محاسبه می‌گردند:

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{f_1 + f_2}{\sqrt{2}} \\ f_y &= \frac{f_1 - f_3}{\sqrt{2}} \quad (1) \\ f_z &= \frac{f_2 + f_4}{2} \end{aligned}$$

ضرایب هیدرودینامیک توپ

مؤلفه‌های نیروی موج وارد بر توپ از معادله موریسون به شرح زیر می‌باشد:

$$\begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} C_d \rho A \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} q + C_m \rho V \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

که u ، v ، w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x ، y ، z می‌باشند. C_d و C_m به ترتیب ضرایب درگ و اینرسی توپ متخلخل‌اند. A مساحت پیشانی توپ، V حجم محصور و ρ چگالی سیال است و:

$$q = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3)$$

یک سری آزمایش با استفاده از موج‌های نامنظم انجام می‌شود تا ضرایب هیدرودینامیک توپ متخلخل اندازه‌گیری گردد. عدد کولگان-کارپنتر توپ (KC) از طریق این فرمول بدست می‌آید:

$$KC = \frac{\sqrt{u_m^2 + w_m^2} T}{D} \quad (4)$$

که u_m و w_m به ترتیب ماکزیمم مؤلفه‌های سرعت نرمال در راستای افقی و عمودی در محل توپ می‌باشند. T پریود موج، D قطر توپ می‌باشد. برای PVM مورد نظر، دیتاهای توپ بصورت زیر است:

استفاده از فرمول رگرسیون، فرمول محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی بدست می‌آید (Naghipour, 1996):

$$\begin{cases} C_d = 0.0004KC^2 - 0.0263KC + 1.5421 \\ C_m = 0.0037KC^2 - 0.1816KC + 4.8839 \end{cases} \quad KC \geq 50 \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_d = -0.0011KC^3 + 0.0247KC^2 - 0.3263KC + 3.0864 \\ C_m = 0.0003KC^3 - 0.0083KC^2 + 0.1271KC + 0.4438 \end{cases} \quad KC < 50 \quad (6)$$

حل معکوس معادله موريسون

نیروهای اندازه‌گیری شده $f_j(t)$ (j از ۱ تا ۴) را طبق معادله (۱) می‌توان به مؤلفه‌های نیروی $f_x(t)$ و $f_y(t)$ و $f_z(t)$ تبدیل کرد. لازم است که مؤلفه‌های نظیر به نظیر سرعت‌های $u(t)$ و $v(t)$ و $w(t)$ را که با مؤلفه‌های این نیرو سازگارند، محاسبه شوند. قابل ذکر است که f_x و f_y و f_z مؤلفه‌های نیروی اندازه‌گیری شده بوسیله توپ و لوله می‌باشند که در کار چاپلین و سابیا (نیروی کل فقط از نیروی توپ بدست می‌آید، به عبارت دیگر از نیروی لوله در مقایسه با نیروی توپ صرف‌نظر شده است) (Chaplin & Subbiah, 1994). پروسه بدست آوردن مؤلفه‌های سرعت، یک پروسه تکراری است و نقطه شروع بوسیله معادله موريسون به شکل زیر صورت می‌پذیرد:

$$\{f_x\} = \bar{k}_d \{u\} + \bar{k}_m \{\dot{u}\} \quad (7)$$

$$\bar{k}_d = \frac{1}{2} \rho C_d A \bar{q} \quad (8)$$

$$\bar{k}_m = \rho C_m V$$

مقدار اولیه برای \bar{C}_d ، \bar{C}_m و \bar{q} باید فرض می‌گردد. اگر تبدیل فوریه (FT) از $f_j(t)$ ، $F_j(k)$ باشد، تبدیل فوریه، $u(t)$ ، $v(t)$ و $w(t)$ برابر $U_x(k)$ ، $U_y(k)$ و $U_z(k)$ می‌گردد که k یک عدد صحیح دال بر اندیس فرکانس و وابسته به فرکانس می‌باشد، مانند $f_k = \frac{2k\pi}{N\Delta t}$ که f_k فرکانس در HZ و N و Δt برای تمام $f_j(t)$ ($j = x, y, z$) مساوی می‌گردد. باید متذکر شد که مقدار اندیس k می‌تواند مقداری مثبت یا منفی باشد، در حقیقت در محاسبات واقعی فوریه گسسته، بوسیله پروسه FFT محاسبه شده است. با فرض پراکندگی هارمونیک $\{u\}$ و $\{\dot{u}\}$ هم‌چون $e^{-i\omega t}$ که فرکانس دایره‌ای است. با FFT از معادله (۷)، تقریب اولیه $U_j(k)$ بدست می‌آید:

$$U_j^{(1)}(k) = \frac{F_j(k)}{\bar{k}_d^{(0)} - ik_m^{(0)} 2\pi f(k)}; \quad j = x, y \text{ or } z \quad (9)$$

$\bar{k}_d^{(0)}$ و $\bar{k}_m^{(0)}$ نشانه شروع میزان انتخاب شده می‌باشند. فوریه معکوس از $U_j(k)$ تقریب اولیه مؤلفه سرعت $u^{(1)}(t)$ ، $v^{(1)}(t)$ و $w^{(1)}(t)$ را می‌دهد. تقریب اولیه مؤلفه‌های شتاب $\dot{u}^{(1)}(t)$ ، $\dot{v}^{(1)}(t)$ و $\dot{w}^{(1)}(t)$ را می‌توان از $u^{(1)}(t)$ ، $v^{(1)}(t)$ و $w^{(1)}(t)$ با استفاده از معادله (۳) بدست آورد. میانگین $q^{(1)}(t)$ در قسمت سری زمانی به شکل $\bar{q}^{(1)}(t)$ استفاده می‌گردد. اکنون می‌توان

تابع پوش $u(t)$ و $v(t)$ و $w(t)$ به ترتیب $\hat{u}(t)$ و $\hat{v}(t)$ و $\hat{w}(t)$ و تابع پوش $\dot{u}(t)$ و $\dot{v}(t)$ و $\dot{w}(t)$ به ترتیب $\hat{\dot{u}}(t)$ و $\hat{\dot{v}}(t)$ و $\hat{\dot{w}}(t)$ را بدست آورد. برای این کار نیاز به محاسبه تبدیل هیلبرت (Hilbert) سری زمانی است. برای سری زمانی $u(t)$ که تبدیل فوریه آن $U_x(k)$ می‌گردد، تبدیل هیلبرت به شکل زیر می‌باشد:

$$H_x(k) = (1 + \text{sgn } k) U_x(k) = \begin{cases} 2U_x(k) & \text{for } k > 0 \\ 0 & \text{for } k \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

تبدیل فوریه معکوس آن $h_x(t)$ است. تابع $h_x(t)$ یک تابع مختلط با قسمت حقیقی $u(t)$ و مقدار موهومی آن با $\tilde{u}(t)$ نمایش داده شده است که تابع هیلبرت $u(t)$ نامیده می‌شود، به عبارت دیگر:

$$h_x(t) = u(t) + i\tilde{u}(t) \quad (11)$$

تابع پوش $u(t)$ با $\hat{u}(t)$ نشان داده شده است:

$$\hat{u}(t) = \sqrt{u^2(t) + \tilde{u}^2(t)} \quad (12)$$

روش بالا برای تابع پوش $u, v, w, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ نیز استفاده می‌گردد. اگر حرکت موج حاکم در راستای x باشد، تغییرات جزئی (Slowly varying) فرکانس سری زمانی ω یا همان $\hat{\omega}(t)$ می‌باشد که از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\hat{\omega}^{(1)}(t) = \frac{\hat{\dot{u}}^{(1)}(t)}{\hat{u}^{(1)}(t)} \quad (13)$$

سپس KC مربوط به توپ را می‌توان برای هر مؤلفه هم‌چون تقریب اولیه محاسبه کرد:

$$\{KC^{(1)}(t)\} = \frac{2\pi}{\hat{\omega}^{(1)}(t)D} \{ \hat{u}^{(1)}(t) \} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \{KC\} &= \langle KC_x, KC_y, KC_z \rangle^T \\ \{\hat{u}\} &= \langle \hat{u}, \hat{v}, \hat{w} \rangle^T \end{aligned} \quad (15)$$

عدد KC برای توپ از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$KC^{(1)}(t) = \sqrt{(KC_x^{(1)}(t))^2 + (KC_y^{(1)}(t))^2 + (KC_z^{(1)}(t))^2} \quad (16)$$

اکنون ضرایب درگ و اینرسی توپ با استفاده از معادله (۵) و (۶) محاسبه گشته و سپس k_d و k_m با استفاده از مقادیر این ضرایب در معادله (۸) بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} k_d^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \rho C_d^{(1)}(t) A q^{(1)}(t) \\ k_m^{(1)} &= \rho C_m^{(1)}(t) V \end{aligned} \quad (17)$$

میزان $k_d^{(1)}$ و $k_m^{(1)}$ در محدوده سری زمانی با استفاده از میزان میانگین شان به ترتیب با $\bar{k}_d^{(1)}$ و $\bar{k}_m^{(1)}$ نشان داده شده، این‌ها و $\bar{q}^{(1)}$ در شروع تکرار دوم معادله (۱۰) برای بدست آوردن $U_j^{(2)}$ و مراحلی که در بالا به آن اشاره شده است، استفاده می‌گردند و تکرار ادامه پیدا می‌کند تا این که بردار سرعت $\{u(t)\}$ با خطای تعیین شده (1×10^{-8}) در نرم برداری اش همگرا شود. می‌توان با فیلتر کردن سرعت و شتاب

بالای 5 Hz در هر گام به دقت بیشتر و همگرایی سریع تر دست یافت. در پروسه بالا دیتای 5370 نقطه بکار گرفته شد که پس از چند مرحله تکرار در هر مورد همگرایی لازم حاصل شد.

برنامه برای مقایسه عددی

کینماتیک موج محاسبه شده از حل معکوس معادله موریسون، برای معتبر ساختن PVM نیازمند مقایسه با کینماتیک اندازه گیری شده می باشد. این اندازه گیری کینماتیک می تواند توسط یک نشان دهنده خوب سرعت هم چون LDA و یا یک روش تجربی صورت گیرد. اگر ارتفاع موج در یک مسیر طولی یکسان مانند ساختار PVM ثبت شده باشد، سپس یک آنالیز فوریه این رکوردها، کینماتیک امواج را با استفاده از اختصاص دادن هر تئوری خطی موج نشان می دهد. تئوری های موج استفاده شده برای این منظور، تئوری موج خطی و تئوری انبساطی ویلر می باشد. مبنای تئوری موج خطی، ارتفاع موج در دریای long crested است. اگر انتشار موج در جهت x باشد:

$$\eta(x, t) = \sum_{j=1}^N \eta_j = \sum_{j=1}^N a_j \cos \theta_j; \quad \theta_j = k_j x - \omega_j t + \beta_j \quad (18)$$

که a_j ، K_j ، ω_j و β_j به ترتیب دامنه، عدد موج، فرکانس موج و فاز j امین هارمونیک و عدد N تعداد دیتا می باشند، برای j امین مؤلفه فرکانس پتانسیل سرعت برابر است با:

$$\phi_j = \frac{a_j \omega_j \cosh k_j (z + d)}{k_j \sinh k_j d} \sin \theta_j \quad (-d \leq z \leq 0) \quad (19)$$

که d عمق آب، K_j عدد موج و ω فرکانس موج است که از رابطه پاکندگی بدست می آید:

$$\omega_j^2 = k_j g \tanh k_j d \quad (20)$$

g شتاب ثقل است، سرعت موج بوسیله معادله زیر داده شده است:

$$(u, w) = \sum_{j=1}^N (u_j, w_j) = \sum_{j=1}^N \nabla \phi_j \quad (21)$$

طبق تئوری خطی سرعت از فرمول زیر بدست می آید:

$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^N \frac{a_j \omega_j}{\sinh k_j d} \begin{Bmatrix} \cosh k_j (z + d) \cos \theta_j \\ \sinh k_j (z + d) \sin \theta_j \end{Bmatrix} \quad (22)$$

که با استفاده از تئوری انبساطی ویلر برای سرعت موج خطی $(-d \leq z_w \leq 0)$ به سطح موج لحظه ای η از میان هم مرتبه سازی و تبدیل مختصات، داریم:

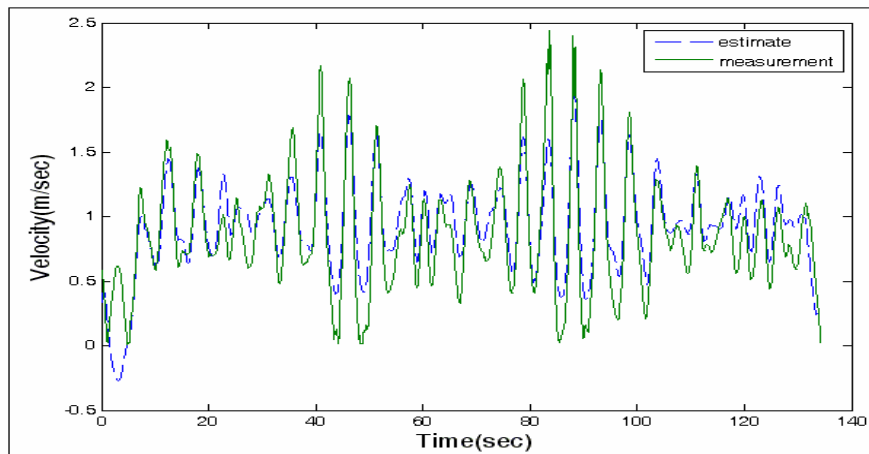
$$z_w + d = \frac{z + d}{1 + \frac{\eta}{d}} \quad (-d \leq z \leq \eta) \quad (23)$$

سرعت موج با جایگزینی z_w به جای z در معادله (22) بدست می آید که در معادله (23) استفاده شد:

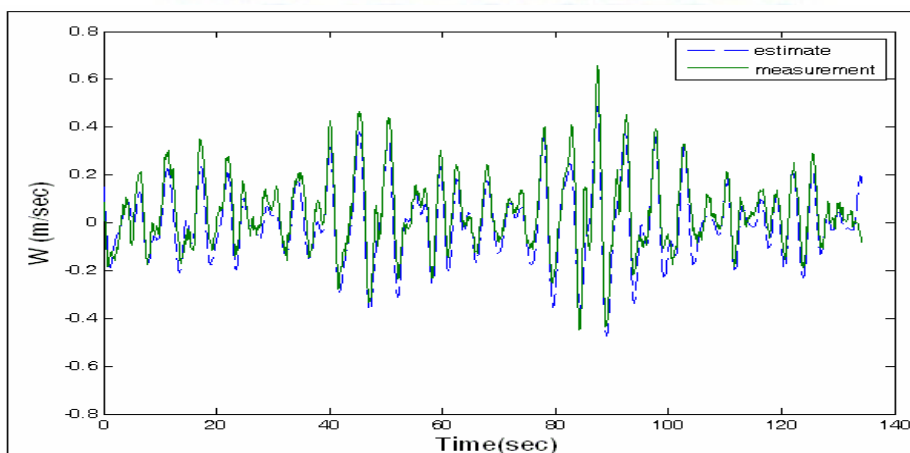
$$\begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^N \frac{a_j \omega_j}{\sinh k_j d} \begin{Bmatrix} \cosh \frac{k_j (z+d)}{1 + \frac{\eta}{d}} \cos \theta_j \\ \sinh \frac{k_j (z+d)}{1 + \frac{\eta}{d}} \sin \theta_j \end{Bmatrix} \quad (-d \leq z \leq \eta) \quad (24)$$

این روش برای سطح آزاد لحظه‌ای η قابل اجراست. از این‌رو برای $\eta(t)$ اندازه‌گیری شده، می‌توان $u(t)$ و $w(t)$ را با استفاده از معادله (۲۵) محاسبه کرده و آن‌را با نتایج نهایی که از PVM حاصل شده است، مقایسه نمود.

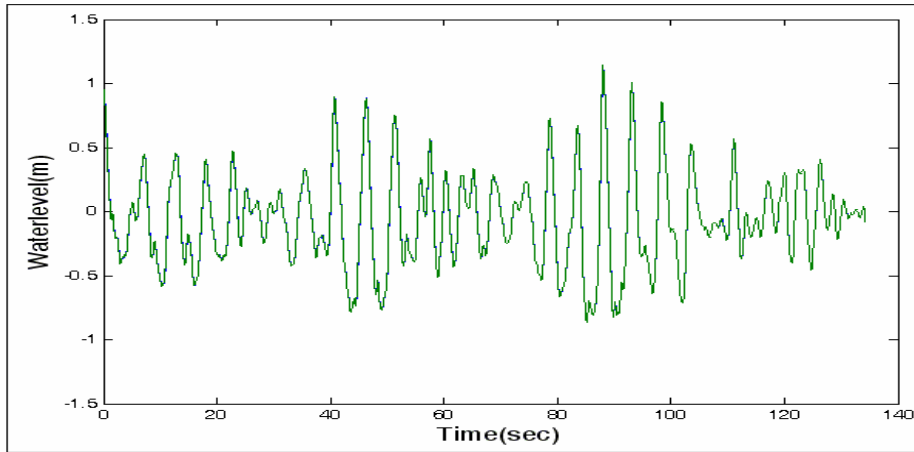
یک نمونه از نتایج اندازه‌گیری با نتایج روش حل معکوس مقایسه گشته و در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده‌اند. کیفیت مقایسه شبیه به مقایسه ارائه شده توسط چاپلین و ساییا (Chaplin & Subbiah, 1994) از میان اندازه‌گیری‌های PVM و LDA است. این نتایج برای $\alpha = 45^\circ$ بدست آمده و از این‌رو $f_y = V = 0$ گشته است.



شکل ۶: مقایسه تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده سرعت ذرات U



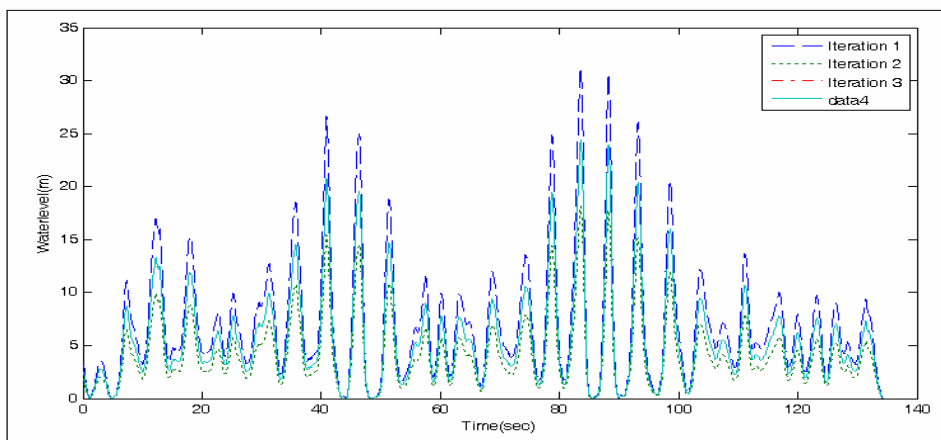
شکل ۷: مقایسه تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده سرعت ذرات W



شکل ۸: مقایسه تاریخچه زمانی اندازه‌گیری شده و تخمین زده سطح آب

شکل عددی حل معکوس معادله موريسون

همگرایی گام‌های تکرار حل معکوس معادله موريسون انجام گرفته است، برای نمونه در جدول (۱)، سه مقدار اولیه \bar{C}_d ، \bar{C}_m و \bar{q} انتخاب شده و مقادیر در گام اول می‌توان قابل قبول نامید، در حالی که همه مقادیر در گروه دوم بزرگتر از مقدار واقعی است و این‌ها در گروه سوم خیلی کمتر از اندازه واقعی‌اند. در حقیقت مقادیر انتخاب شده ضرایب گروه دوم و سوم فراتر از محدوده ضرایب داده شده در معادله (۵) و (۶) می‌باشند. این می‌تواند بوسیله محاسبه ضرایب در مقادیر محدوده KC توپ ثابت یا معین شود. همگرایی $u(t)$ به‌عنوان حرکت تکراری در شکل (۹) نشان داده شده است. کیفیت همگرایی $w(t)$ نیز مشابه است. دامنه تغییرات $\{u(t)\}$ در نرم برداری در همه روش‌ها (1×10^{-8}) است، نرم خطا (1×10^{-4}) بدست می‌آید. برای رسیدن به نرم (1×10^{-8})، ۱۲-۱۳ تکرار باید صرف شود. همچنین با وجود این‌که \bar{k}_d ، \bar{k}_m و \bar{q} از مقادیر واقعی‌شان در تکرار اول بسیار دورند در تکرار چهارم به مقادیر واقعی خود نزدیک می‌شود. ترکیبات زیاد دیگری از مقادیر اولیه که تعدادی از آن‌ها کمتر از حد واقعی و تعدادی از آن‌ها بیشتر از حد واقعی بودند، انتخاب شدند.



شکل ۹: همگرایی تکرار معکوس معادله موريسون

استفاده از PVM در کار چاپلین و سایا در مقیاس کوچک مطالعه شده بود. در این مقاله بعضی از جنبه‌ها PVM در سطح وسیع‌تر و در مقیاس واقعی مورد مطالعه قرار گرفت. حل معکوس معادله موریسون ارائه شده در این مقاله، تنوعی کاملاً جامع در طراحی اندازه اجزای PVM را تأیید می‌کند، چون انتخاب یک سطح مقطع عرضی کوچکتر از لوله مشکلاتی از قبیل لرزش و انحراف پایه نگهدارنده را ایجاد می‌کند. ابتدا با استفاده از حل معکوس معادله موریسون برای مبدل ساختار توپ و لوله، سرعت ذرات آب تخمین زده شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط EFM مقایسه گشته و سپس با استفاده از تئوری خطی پروفیل سطح آب محاسبه گردیده و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. در این راستا آنالیز فوریه بکار گرفته شده و نهایت ملاحظه گردید که مقادیر محاسبه شده از PVM می‌تواند با دقت مناسب مقادیر اندازه‌گیری شده یکسان باشد. این روش نشان می‌دهد که می‌توان برای مقایسه از کینماتیک اندازه‌گیری شده‌ای که بوسیله آنالیز فوریه ارتفاع موج ثبت شده بدست می‌آید به جای وسایل گران اندازه‌گیری سرعت مانند LDA استفاده نمود و اندازه‌گیری کینماتیک می‌تواند برای پیشگویی ارتفاع سطح آزاد با دقت خوب استفاده شود.

جدول ۱: همگرایی تکرار در معکوس معادله موریسون

Iteration No.	u	$u(i+1) - u(i)$	w	$w(i+1) - w(i)$	\bar{k}_d	\bar{k}_d	\bar{q}
2	3.122991777	2.67563885	0.48660771	0.41690359	1.003769653	0.275285756	0.124427714
3	0.447352927	0.25641821	0.06970412	0.0399537	0.743760773	0.271028559	0.078104011
4	0.190934718	0.68206369	0.02975042	0.10627548	0.678125728	0.273065284	0.067282078
5	0.872998405	0.20136068	0.1360259	0.03137493	0.755782741	0.273821008	0.080895135
6	0.671637725	0.21888293	0.10465096	0.03410516	0.753573243	0.272939814	0.080283527
7	0.452754793	0.1168212	0.07054581	0.01820245	0.729313723	0.272962694	0.076099874
8	0.569575989	0.07190872	0.08874825	0.01120443	0.736839841	0.273219657	0.077463963
9	0.641484709	0.07999952	0.09995268	0.01246509	0.741905291	0.273138068	0.078318827
10	0.561485188	0.00906663	0.08748759	0.00141271	0.738161352	0.273084159	0.077658348

مراجع:

- Bhattacharyya, S.K., Mathew, V., Idichandy, V.G., "Inverse problem of Morison equation for a perforated-ball velocity meter: an improved method", Applied Ocean Research 2000;22:183-189.
- Bishop, J.R., "Wave force investigations at the second Christchurch Bay Tower", National Maritime Institute Report, 1984, p.177.
- Chakrabarti, S.K., "Hydrodynamic of offshore structure", Southampton, UK: Computational Mechanics Publication, New York, 1987.
- Chaplin, J.R., Subbiah K., " Velocity measurements in multi-directional wave using a perforated-ball meter", Applied ocean research, 16:223-34, 1994.
- Mackwood, P.R., "Wave & current flow around circular cylinders at larg scale", LIP Project 10D, PP.27, 1993.
- Naghipour, M., "The accuracy of hydrodynamic force prediction for offshore structure & Morison's equation", PhD Thesis, heriot-watt university, Edinburgh, 1996.
- Stearns, S.D., & David, R.A., "Signal processing algorithms in FORTRAN and C.Englewood Cliffs", NJ: P.T.R. Prentice-Hall, 1993.
- Wheeler, J.D., "Method for calculating forces produced by irregular waves", Journal of Petroleum Technology 1970; march:359-367.
- Wolfram, J., Naghipour, M., " On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders", Applied Ocean Research, Volume 21, Issue 6, December 1999, Pages 311-328.

Measurement of Effective Forces Applied to Perforated-Ball Velocity Meter (PVM) through Solving Morison Reciprocal Equation

Abstract

Perforated-ball velocity meter is means by which it is possible to measure the forces that are applied to the columns that support the ball and pipe. It can measure all the three velocity-related variables in different depth through fixing the sensors in those depths. Wave kinematic is calculated through Morison reciprocal equation. Drag and inertia coefficient of the ball can be determined in laboratory and the forces that have been applied to the ball are used in solving Morison reciprocal equation. In this article, laboratory data are used to measure kinematic through the PVM that had been performed in delta wave in Delft laboratory. Measuring the height of free surface, theory of linear wave and theory of wheeler formation are established through numerical analysis. A comparison of these data revealed that the measuring the kinematic by PVM can result in precisely determination of the height of free surface.

Keywords: *Morison reciprocal equation, Wave kinematic, inertia coefficient*